

РАСЧЕТ ОБДЕЛОК, СОЗДАВАЕМЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА КОЛЛЕКТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ МЕТОДОМ "ТРУБА В ТРУБЕ"

А.С. Саммаль, О.М. Левищева, Т.Г. Саммаль, Тульский государственный университет, Россия

Предлагается аналитический метод определения напряженного состояния трехслойных подземных конструкций, создаваемых в результате восстановительного ремонта бестраншейным способом коллекторных тоннелей глубокого заложения. Метод иллюстрируется примерами расчета.

Опыт эксплуатации коммунальных коллекторных тоннелей показывает, что основной причиной их аварий является снижение несущей способности обделок в результате локальных разрушений, приводящих к уменьшению толщины подземной конструкции в лотке, обусловленному истирающим действием находящихся в сточных водах абразивных частиц, и в сводовой части обделки, вследствие биохимической коррозии бетона в высокоагрессивной газовой среде выше уровня стоков [1]. В связи с этим в последнее время большое внимание уделяется разработке новых способов ремонта обделок коллекторных тоннелей, в том числе - выполняемого без вывода подземного сооружения из эксплуатации.

На сегодняшний день одним из перспективных направлений в технологиях восстановления коллекторных тоннелей является метод «труба в трубе», который позволяет производить ремонтные работы без вскрытия грунта по длине тоннеля и гарантирует сохранность всей инфраструктуры на поверхности. При этом в ходе ремонта внутри старой поврежденной обделки протягивается пластиковая труба, а имеющий место зазор заполняется связующим раствором (как правило, на основе цемента). В результате создается новая трехслойная подземная конструкция, несущая способность которой определяется степенью изношенности старой бетонной обделки, а также параметрами прокладываемой пластиковой трубы и свойствами применяемого материала заполнения.

Следует отметить, что в настоящее время не существует научно-обоснованных методов определения несущей способности реконструированных обделок коллекторных тоннелей, и, следовательно, проблема оценки эффективности восстановительного ремонта подземных сооружений методом «труба в трубе» остается актуальной. В связи с этим в Тульском государственном университете в течение ряда лет ведутся исследования, направленные на разработку теории и методов оценки напряженного состояния таких сооружений. В настоящей работе предлагается новый аналитический метод расчета обделок, создаваемых в результате восстановительного ремонта круговых коллекторных тоннелей глубокого заложения. В основу предлагаемого метода положено строгое решение плоской задачи теории упругости для трехслойного кольца, моделирующего обделку тоннеля, подкрепляющего отверстие в линейно-деформируемой бесконечной среде, моделирующей массив грунта (пород). Общая расчетная схема приведена на рис. 1.

Здесь среда S_0 , деформационные свойства которой характеризуются модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 , моделирует массив пород. Кольца переменной толщины S_1 и S_2 , материалы которых имеют деформационные характеристики E_j, ν_j ($j=1, 2$), моделируют старую обделку тоннеля, подвергшуюся повреждению в процессе эксплуатации, и заполняющий слой соответственно (принимается, что первоначально тоннель имел круглое поперечное сечение, поэтому наружный контур L_0 представляет собой окружность). Внутреннее круговое кольцо S_3 , имеющее наружный и внутренний радиусы R_2 и R_3 , выполненное из материала с деформационными характеристиками E_3, ν_3 , моделирует трубу ПВХ. Центр кольца S_3 сдвинут вниз по вертикали относительно общего начала координат, совпадающего с центром контура L_0 ,

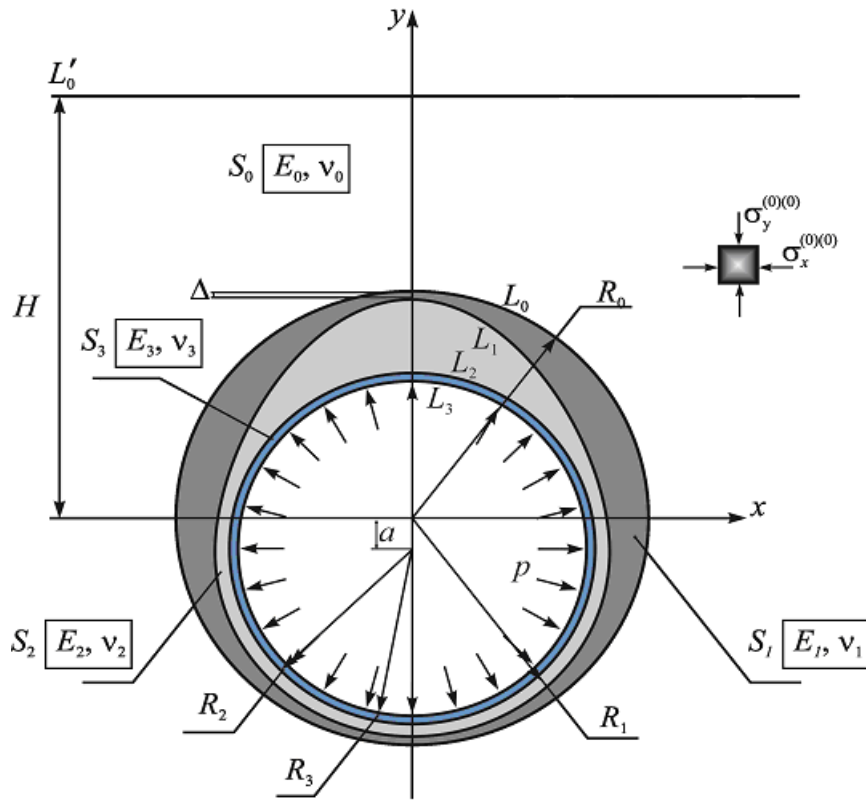


Рис. 1. Расчетная схема обделки коллекторного тоннеля восстановленного методом «труба в трубе»

Слои кольца S_j ($j=1, 2, 3$) и среда S_0 деформируются совместно, т.е. на линиях контакта L_j ($j=0, 1, 2$) выполняются условия непрерывности векторов смещение и полных напряжений.

Внутренний контур L_3 свободен от внешних сил, либо нагружен равномерным нормальным давлением - p , моделирующим действие жидкости, заполняющей тоннель (рассматривается наиболее опасный напорный режим работы тоннеля в период водосброса).

Рассматривается случай глубокого заложения тоннеля, который с точки зрения моделирования напряженного состояния подземной конструкции является более простым, поскольку при больших глубинах принято использовать допущение о том, что величина ординаты y по сравнению со значительно превосходящей ее глубиной H считается пренебрежимо малой, при этом можно отказаться от точного выполнения условия на границе L'_0 , то есть определять компоненты напряжений не в полуплоскости, а в бесконечной плоскости [2].

Таким образом, действие собственного веса пород моделируется наличием в области S_0+S_1 начальных напряжений, определяемых формулами:

$$\sigma_x^{(0)(0)} = -\lambda\gamma H\alpha^*, \quad \sigma_y^{(0)(0)} = -\gamma H\alpha^*, \quad \tau_{xy}^{(0)(0)} = 0, \quad (1)$$

где γ – удельный вес пород, H – глубина заложения выработки, λ – коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве, α^* – корректирующий множитель, введенный для учета технологических особенностей сооружения обделки [2].

Решение поставленной задачи получено с использованием теории аналитических функций комплексного переменного, аппарата конформных отображений и свойств комплексных рядов.

На первом этапе с помощью рациональной функции

$$z = R_1\omega(\zeta) = R_1\left(\zeta + \sum_{v=1}^{n+1} q_v \zeta^{1-v}\right), \quad (2)$$

осуществляется конформное отображение внешности единичной окружности в плоскости переменной ζ на внешность контура L_1 в плоскости переменной z (R_1 – средний радиус не-

кругового контура L_1).

Далее, принимая во внимание, что наружный контур кольца L_0 имеет круговое очертание, а центр внутреннего кольца S_3 , ограниченного радиусами R_2, R_3 , смещен на расстояние a по вертикали (мнимой оси y) относительно общего начала координат, вводятся следующие представления для точек, принадлежащих соответствующим контурам L_j ($j=0,...,3$),

$$t = \begin{cases} R_0\sigma, & \text{на } L_0 \\ R_1\omega(\sigma), & \text{на } L_1 \\ R_j\sigma - ia, & \text{на } L_j \ (j=2,3) \end{cases} \quad (3)$$

здесь $\sigma = e^{i\theta}$ - точка единичной окружности.

После введения комплексных потенциалов $\tilde{\varphi}_j(z)$, $\tilde{\psi}_j(z)$ ($j=0,...,3$), характеризующих напряженное состояние областей S_j ($j=0,...,3$), связанных с дополнительными напряжениями и смещениями известными формулами Колосова - Мусхелишвили, сформулированные задачи теории упругости сводятся к решению соответствующих краевых задач теории аналитических функций комплексного переменного при следующих граничных условиях [3]:

- на L_j ($j=0,1,2$)

$$\tilde{\varphi}_{j+1}(t) + t\overline{\tilde{\varphi}'_{j+1}(t)} + \overline{\tilde{\psi}_{j+1}(t)} = \tilde{\varphi}_j(t) + t\overline{\tilde{\varphi}'_j(t)} + \overline{\tilde{\psi}_j(t)} + f_j(t), \quad (4)$$

$$\alpha_{j+1}\tilde{\varphi}_{j+1}(t) - t\overline{\tilde{\varphi}'_{j+1}(t)} - \overline{\tilde{\psi}_{j+1}(t)} = \frac{\mu_{j+1}}{\mu_j} [\alpha_j\tilde{\varphi}_j(t) - t\overline{\tilde{\varphi}'_j(t)} - \overline{\tilde{\psi}_j(t)}];$$

- на L_3

$$\tilde{\varphi}_3(t) + t\overline{\tilde{\varphi}'_3(t)} + \overline{\tilde{\psi}_3(t)} = f_3(t) \quad (5)$$

Здесь $\mu_j = \frac{E_j}{2(1+\nu_j)}$, $\alpha_j = 3 - 4\nu_j$ ($j=0,...,3$), функции $f_j(t)$ ($j=0,...,3$) определяются в за-

висимости от рассматриваемого вида нагружения [3].

Таким образом, поставленная задача сводится к отысканию трех пар комплексных потенциалов $\tilde{\varphi}_j(z)$, $\tilde{\psi}_j(z)$ ($j=0,...,3$) и решается так же, как описано в работе [4].

В силу отсутствия в общем случае геометрической и силовой симметрии задачи относительно действительной оси x искомые потенциалы представляются в виде [3]

$$\tilde{\varphi}_j(z) = -\frac{X+iY}{2\pi(1+\alpha_j)} \ln z + \varphi_j(z), \quad \tilde{\psi}_j(z) = \alpha_j \frac{X-iY}{2\pi(1+\alpha_j)} \ln z + \psi_j(z), \quad (6)$$

где $X+iY$ - главный вектор действующих сил, $\varphi_j(z)$, $\psi_j(z)$ - функции регулярные в соответствующих областях S_j ($j=0,...,3$)

Функции $\varphi_0(z), \psi_0(z)$, регулярные вне окружности L_0 , отыскиваются в виде

$$\varphi_0(z) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v^{(1)(0)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^{-k}; \quad \psi_0(z) = \sum_{v=0}^{\infty} c_v^{(2)(0)} \left(\frac{z}{R_0} \right)^{-k}. \quad (7)$$

В свою очередь, потенциалы $\varphi_1(z)$, $\psi_1(z)$, регулярные в кольце S_1 , представляются на его контурах следующим образом:

- на контуре L_0

$$\varphi_1(t) = \varphi_{1,0}(\sigma) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v^{(1)(1)} \sigma^{-k} + \sum_{v=0}^{\infty} c_v^{(3)(1)} \sigma^k, \quad (8)$$

$$\psi_1(t) = \psi_{1,0}(\sigma) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v^{(2)(1)} \sigma^{-k} + \sum_{v=0}^{\infty} c_v^{(4)(1)} \sigma^k ,$$

–на контуре L_1

$$\varphi_1(t) = \varphi_1[R_1\omega(\sigma)] = \varphi_{1,1}(\sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(1)} \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{-k} [\omega(\sigma)]^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(1)} \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^k [\omega(\sigma)]^k , \quad (9)$$

$$\psi_1(t) = \psi_1[R_1\omega(\sigma)] = \psi_{1,1}(\sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(2)(1)} \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{-k} [\omega(\sigma)]^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(4)(1)} \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^k [\omega(\sigma)]^k .$$

Далее, используются представления

$$\begin{aligned} [\omega(\sigma)]^{-k} &= \sigma^{-k} + \sum_{v=1}^{\infty} q_v^{(-k)} \sigma^{-v-k} \quad (k = 1, \dots, \infty) \\ [\omega(\sigma)]^k &= \sigma^k + \sum_{v=1}^{\infty} q_v^{(k)} \sigma^{k-v} \quad (k = 0, \dots, \infty), \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты $q_v^{(k)}$ ($k = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty, v = 1, \dots, \infty$) находятся по известным рекуррентным формулам Д.И.Шермана.

В результате, после подстановки соотношений (10) в формулы (9) с учетом выражений (8) удастся записать на L_1

$$\begin{aligned} \varphi_{1,1}(\sigma) &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(1)} \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{-k} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(1)} \sum_{v=1}^{\infty} q_v^{(-k)} \sigma^{-k-v} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(1)} \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^k \sigma^k + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(3)(1)} \sum_{v=1}^{\infty} q_v^{(k)} \sigma^{k-v} = \varphi_{1,0} \left(\frac{R_1}{R_0} \sigma \right) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(1)(1)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(3)(1)} \sigma^k \end{aligned} \quad (11)$$

и аналогично

$$\psi_{1,1}(\sigma) = \psi_{1,0} \left(\frac{R_1}{R_0} \sigma \right) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(2)(1)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(4)(1)} \sigma^k , \quad (12)$$

где $C_k^{(l)(1)}$ ($l = 1, \dots, 4; k = 1, \dots, \infty$) –коэффициенты комплексных рядов, характеризующих отличие контура L_1 от кругового.

Потенциалы $\varphi_j(z), \psi_j(z)$ ($j = 2, 3$), регулярные в кольцах S_j ($j = 2, 3$), представляются аналогичным образом:

$$\varphi_j(t) = \varphi_{j,s} \left(\frac{R_s}{R_0} \sigma \right) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(j)} \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^{-k} \sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(j)} \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^k \sigma^k + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(1)(s)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(3)(s)} \sigma^k \quad (13)$$

$$\psi_j(t) = \psi_{j,s} \left(\frac{R_s}{R_0} \sigma \right) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(2)(j)} \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^{-k} \sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(4)(j)} \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^k \sigma^k + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(2)(s)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(4)(s)} \sigma^k ,$$

здесь $C_k^{(l)(s)}$ ($l = 1, \dots, 4; k = 1, \dots, \infty$) –коэффициенты комплексных рядов, характеризующих отличие контура L_1 от кругового (при $s=1$), а также сдвигку круговых контуров L_s ($s = 2, 3$) относительно общего начала координат.

Далее, с целью общности записи вводя на L_0 вытекающие из (7) представления

$$\varphi_0(t) = \varphi_{0,0}(\sigma) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v^{(1)(0)} \sigma^{-k}, \quad \psi_0(t) = \psi_{0,0}(\sigma) = \sum_{v=1}^{\infty} c_v^{(2)(0)} \sigma^{-k}, \quad (14)$$

и используя обозначения $r_j = \frac{R_j}{R_0}$ ($j=0, \dots, 3$), граничные условия (4)–(5) с учетом соотношений (6), (8)–(14) можно представить в виде

$$\overline{\varphi_{j+1,j}(r_j\sigma) + r_j\sigma\overline{\varphi'_{j+1,j}(r_j\sigma)} + \overline{\psi_{j+1,j}(r_j\sigma)}} = \overline{\varphi_{j,j}(r_j\sigma) + r_j\sigma\overline{\varphi'_{j,j}(r_j\sigma)} + \overline{\psi_{j,j}(r_j\sigma)}} + \sum_{k=1}^{\infty} (L_k^{(1)(j)} + \tilde{L}_k^{(1)(j)})\sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} (L_k^{(3)(j)} + \tilde{L}_k^{(3)(j)})\sigma^k \quad (15)$$

при $j=0, 1, 2$

$$\begin{aligned} \overline{\varphi_{j+1,j}(r_j\sigma) - \frac{R_j}{R_0}\sigma\overline{\varphi'_{j+1,j}(r_j\sigma)} - \overline{\psi_{j+1,j}(r_j\sigma)}} &= \frac{\mu_{j+1}}{\mu_j} \left[\overline{\varphi_{j,j}(r_j\sigma) - r_j\sigma\overline{\varphi'_{j,j}(r_j\sigma)} - \overline{\psi_{j,j}(r_j\sigma)}} \right] \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} (L_k^{(2)(j)} + \tilde{L}_k^{(2)(j)})\sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} (L_k^{(4)(j)} + \tilde{L}_k^{(4)(j)})\sigma^k \end{aligned}$$

$$\overline{\varphi_{3,3}(r_3\sigma) + r_3\sigma\overline{\varphi'_{3,3}(r_3\sigma)} + \overline{\psi_{3,3}(r_3\sigma)}} = \sum_{k=1}^{\infty} (L_k^{(1)(3)} + \tilde{L}_k^{(1)(3)})\sigma^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} (L_k^{(3)(3)} + \tilde{L}_k^{(3)(3)})\sigma^k \quad (16)$$

где комплексные коэффициенты $\tilde{L}_k^{(j)(s)}$ ($j=1, \dots, 4$; $s=0, \dots, 3$; $k=0, \dots, \infty$) рядов в правых частях условий (15)–(16) определяются в зависимости от вида рассматриваемой нагрузки, а ряды с коэффициентами $L_k^{(j)(s)}$ ($j=1, \dots, 4$; $s=0, \dots, 3$; $k=0, \dots, \infty$) отражают влияние отличия внутреннего контура L_1 от кругового, а также сдвижки центра контуров L_s ($s=2, 3$) относительно общего начала координат.

В результате, рассматриваемая задача для трехслойного кольца со слоями переменной толщины, сводится к задаче для концентрического трехслойного кругового кольца, подкрепляющего отверстие в линейно-деформируемой среде, при наличии в граничных условиях дополнительных членов, представленных в виде рядов Лорана, которая в предположении, что эти дополнительные члены известны, имеет строгое аналитическое решение. Таким образом, предложенный прием позволяет свести решение исходной задачи к сходящемуся итерационному процессу, при котором в каждом приближении решается соответствующая задача для кругового концентрического трехслойного кольца с дополнительными рядами в граничных условиях, уточняемыми на основе предыдущих приближений (в нулевом приближении коэффициенты $L_k^{(j)(s)}$ ($s=0, \dots, 3$; $j=1, \dots, 4$) этих дополнительных рядов полагаются равными нулю). Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока отличия искомых коэффициентов соответственным образом укороченных бесконечных рядов $c_k^{(1)(0)}$ ($k=1, \dots, N$); $c_k^{(2)(0)}$ ($k=1, \dots, N+2$), $c_k^{(j)(s)}$ ($j=1, 4$; $k=1, \dots, N$), $c_k^{(j)(s)}$ ($j=2, 3$; $k=1, \dots, N+2$), полученных в двух соседних приближениях, не становятся меньше заданной малой величины ε , например, $\varepsilon=10^{-6}$.

После отыскания неизвестных коэффициентов рядов напряжения в слоях S_j ($j=1, \dots, 3$), моделирующих слои обделки, и в среде S_0 , моделирующей массив пород, определяются по формулам Колосова – Мусхелишвили. Для проверки точности решения выполняется контроль удовлетворения граничных условий. Если граничные условия выполняются не достаточно точно, число N удерживаемых членов в рядах увеличивается (при этом, как показывает

опыт, удержание $N=40$ членов обеспечивает достаточную для практических целей точность расчета), а величина ε , наоборот, уменьшается.

Описанное решение реализовано в полном алгоритма, на базе которого разработано соответствующее компьютерное программное обеспечение, позволяющее производить эффективные многовариантные расчеты.

Ниже в качестве иллюстрации приводится пример определения напряжений в обделке коллекторного тоннеля, восстановленного бестраншейным методом, при действии гравитационных сил в массиве. Принимается, что вследствие газовой коррозии бетона в процессе эксплуатации тоннеля в сводовой его части образовалась локальная зона разрушения, в которой толщина конструкции уменьшилась до 0.05 м. При восстановительном ремонте предполагается прокладка внутри старой обделки трубы из ПВХ Flowtite, причем труба укладывается на лоток старой обделки с небольшим зазором. Пространство между внутренней трубой и обделкой заполняется цементным раствором.

При расчете использовались следующие исходные данные: $R_0=1.25$ м, $R_1=1.0$ м, $R_2=0.924$ м, $R_3=0.9$ м; $a=0.06$ м, $E_0=1500$ МПа, $\nu_0=0.3$; $E_1=30000$ МПа, $\nu_1=0.2$; $E_2=17000$ МПа, $\nu_2=0.2$; $E_3=5000$ МПа, $\nu_3=0.25$, $\lambda=0.6$.

Результаты расчета представлены на рис. 2, а,б в виде эпюр безразмерных (в долях величины $\gamma H \alpha^*$) расчетных нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем $\sigma_\theta^{(in)}$ и наружном $\sigma_\theta^{(ex)}$ контурах трубы (рис. 2, а), а также в материале заполнителя на контурах, контактирующих с трубой и старой обделкой, обозначенные, как $\tilde{\sigma}_\theta^{(in)}$, $\tilde{\sigma}_\theta^{(ex)}$ соответственно (рис. 2,б). В силу симметрии каждая из эпюр дана для половины сечения.

Как следует из приведенных результатов, имевшее место до ремонта локальное уменьшение толщины в сводовой части бетонной обделки оказывает влияние на распределение напряжений в прокладываемой трубе из ПВХ и в слое заполнения. Это обстоятельство, которое может оказаться весьма существенным в других горно-геологических условиях и при применении материалов с другими свойствами, необходимо учитывать при проектировании восстановительного ремонта коллекторных тоннелей бестраншейным способом.

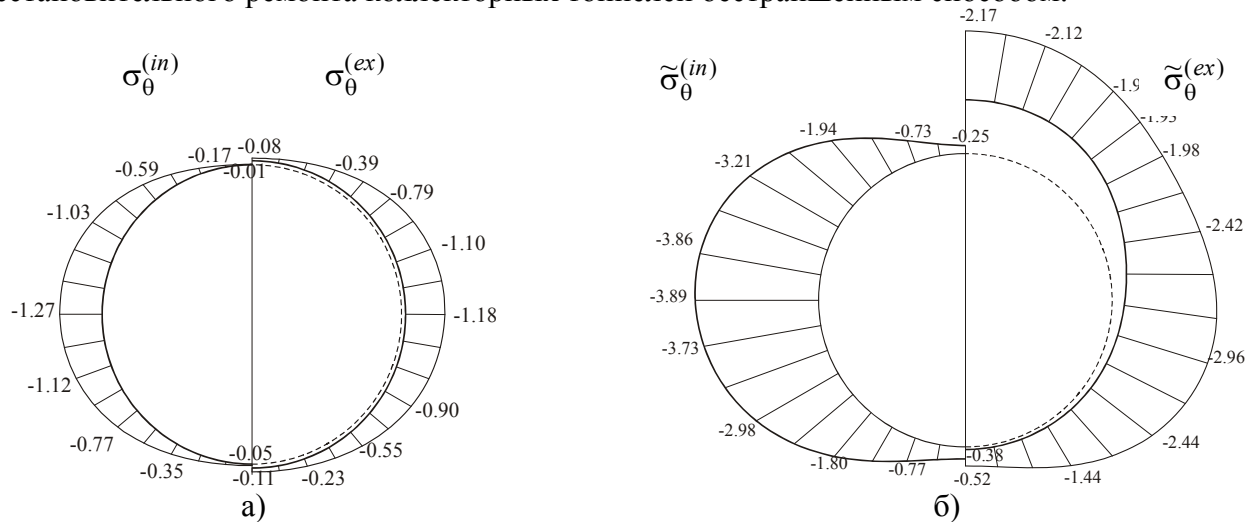


Рис. 2. Расчетные напряжения на контурах поперечного сечения элементов созданной в ходе ремонта обделки коллекторного тоннеля
а – в трубе ПВХ, б – в слое заполнителя

В заключение отметим, что вычисленные напряжения в соответствии с принципом суперпозиции должны быть просуммированы с результатами расчета на другие виды воздействий (в самых неблагоприятных сочетаниях), после чего может быть произведена оценка несущей способности обделки.

Список литературы

1. Дрозд Г.Я. Надежность канализационных сетей //Водоснабжение и санитарная техника. - №10.-1995.- С. 2-4.
2. Булычев Н.С. О расчете обделок тоннелей в очень слабых грунтах// Проблемы подземного строительства в XXI веке. Труды международной конференции. Тула, Россия 25 – 26 апреля 2002 г. – Тула: Изд. ТулГУ, 2002. – С. 35 – 37.
3. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости /Н.И. Мусхелишвили. - М.: Наука, 1966. - 708 с.
4. Фотиева Н.Н., Саммаль Т.Г. Прогноз снижения несущей способности обделки кругового тоннеля вследствие локального уменьшения ее толщины, обусловленного коррозией бетона //Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте. Сб. трудов IV Междунар. конф. 29-30 июня 1999 г. – С.-Петербург, 1999. – С. 197 – 201.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЛОКАЛЬНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ СВОДЧАТОГО СЕЧЕНИЯ

А.С. Саммаль, О.А. Соловьева, О.В. Афанасова, Тульский государственный университет, Россия

Приводится описание разработанного авторами аналитического метода расчета обделок тоннелей произвольного поперечного сечения на действие внутреннего локального вертикального давления, и анализируются результаты выполненных с использованием этого метода исследований влияния основных факторов на напряженное состояние обделки сводчатого очертания.

При проектировании тоннелей, особенно сооружаемых в сложных горнотехнических условиях, особую актуальность приобретают вопросы учета влияния внутренних нагрузок большой интенсивности, распределенных локально по контуру выработки, на несущую способность подземной конструкции. К таким нагрузкам можно отнести, например, вес тяжелой техники и складированных материалов, нагрузки от движущихся в тоннеле транспортных средств, усилий домкратов, подъемных устройств и пр. Очевидно, обоснованная оценка влияния таких воздействий на прочность подземных сооружений, необходима для принятия эффективных проектных решений, связанных с их усилением путем локального увеличения толщины конструкции или коэффициента армирования опасных ее сечений.

В настоящей работе на основе обобщения накопленного в Тульском государственном университете опыта математического моделирования напряженного состояния подземных сооружений при различных видах воздействий [1, 2] предлагается новый, базирующийся на современных представлениях геомеханики о взаимодействии подземной конструкции и окружающего массива горных пород как элементов единой деформируемой системы, аналитический метод расчёта обделок тоннелей произвольного поперечного сечения на действие внутреннего вертикального равномерного давления, распределенного по части контура обделки^{*)}.

^{*)} Работа выполнена при поддержке грантом МК-164.2009.5